

Etude de la pédofaune proche de l'usine d'aluminium de Steg, VS

I. Les communautés carabiques

par Jacques Claivoz¹



Bulletin de la
Pédofaune

116 • 1998
Page 23

La fonderie d'aluminium de Steg, VS. – PHOTO JACQUES CLAIVOZ

ZUSAMMENFASSUNG

Studie der Pedofauna nahe dem Aluminiumwerk von Steg I. Die Gemeinschaften des Laufkäfers

Das Aluminiumwerk verschmutzt die Gegend mit wichtigen Fluorkonzentrationen. Die Arthropoden sind eine sehr interessante Tiergruppe für die Beobachtung der Bioaccumulation der giftigen Produkte. Denn sind die Laufkäfer mit anderen Arthropodengruppe gewählt worden, um die Fluorkonzentration in der Fauna nahe dem Werk zu studieren. Ein Faunistikstudium ist gemacht worden, um zu wissen, ob die Verschmutzung einen direkten Einfluss über die Verteilung der Arten hat. Es scheint, dass die Laufkäfer zuerst auf das Mikroklimat, auf die Vegetationstypen und auf die Bodentypen reagieren und dass sie in mehreren Gemeinschaften organisiert sind.

RESUMÉ

Etude de la pédofaune proche de l'usine d'aluminium de Steg I. Les communautés carabiques

L'usine d'aluminium pollue la région avec d'importantes concentrations de fluor. Les arthropodes sont un groupe très intéressant pour l'observation de la bioaccumulation de produits toxiques. C'est pourquoi les carabes ont été choisis avec d'autres groupes d'arthropodes pour étudier la concentration de fluor dans la faune autour de l'usine. Une étude faunistique a été réalisée afin de savoir si la pollution a une influence directe sur la répartition des espèces. Il semble que les carabes réagissent d'abord au microclimat, au type de végétation et au type de sol et sont de ce fait organisé en plusieurs communautés.

Mots clés: Coléoptères; carabidés; communautés; diversité.

¹ Pl. de l'Envol 5, 1950 Sion

INTRODUCTION

Cette étude a été réalisée dans le but d'approcher le problème de la bioaccumulation du fluor à travers la faune du sol. Parmi les groupes zoologiques utilisés, les carabes ont fait l'objet d'une étude plus approfondie. La famille des *Carabidae* a été choisie parce que ces coléoptères démontrent une sensibilité certaine aux changements de l'environnement, ce qui en fait de très bons indicateurs écologiques avec un vaste spectre d'application (LUKA, 1996).

Les Carabes

La famille des *Carabidae* appartient à l'ordre des coléoptères reconnaissables à leurs ailes sclérotisées appelées élytres. Elle fait partie aussi du sous-ordre des adéphages caractérisés par leurs hanches postérieures fermement rattachées au métasternum, dépassant largement le bord postérieur du premier sternite abdominal visible. Les carabes sont les seuls adéphages terrestres aux pattes adaptées à la course, aux antennes généralement filiformes allant en s'amincissant et aux pièces buccales visibles à la face inférieure.

Cette famille comprend aussi bien des espèces diurnes que nocturnes. On trouve ces espèces dans tous les types d'habitats jusqu'à plus de 2000 mètres d'altitude, cachées sous des pierres ou entre des racines. Le régime alimentaire est très varié; il existe aussi bien des espèces strictement carnivores que des espèces au régime mixte et des espèces strictement herbivores.

Cycle annuel

Le cycle de reproduction des carabes permet de les classer en cinq catégories distinctes (THIELE, 1977):

1) les automnaux (autumn-breeders) se reproduisent à la fin de l'été et en automne; ce sont les larves qui passent l'hiver.

2) les printaniers avec activité automnale (spring-breeders with autumn activity) se reproduisent au printemps et au début de l'été; ce sont les adultes qui hibernent et meurent pour la plupart après la période de reproduction. La nouvelle génération apparaît en automne et est pleinement active bien qu'elle ne se reproduise qu'après l'hibernation.

3) les printaniers sans activité automnale (spring-breeders without autumn activity) ont le même cycle que les précédents excepté que la nouvelle génération est peu active en automne.

4) les espèces qui ont une période de reproduction variable suivant le climat et dont les larves peuvent se développer aussi bien en été qu'en hiver.

5) les espèces qui ont besoin de plusieurs années pour se développer.

Situation générale

L'étude se situe autour de l'usine d'aluminium de Steg. Celle-ci se trouve dans la plaine du Rhône entre Sierre et Brig. Les coordonnées sur la carte nationale 1:25000 de Raron sont 625/129 à l'altitude de 630 mètres. Sept stations ont été choisies pour le piégeage, elles se trouvent dans l'axe de la vallée, parallèlement aux vents dominants et donc dans la zone des rejets provenant des cheminées de l'usine (tab. 1). Parmi ces sept stations, une seule se trouve en aval de l'usine: c'est la station G, utilisée comme témoin. Les stations A,B,C et G sont des aulnaies blanches sèches à bouleaux; les stations E et F sont des prairies dégradées à humidité temporaire de la classe des *Molinio-Arrhenatheretea*; la station D est une aulnaie blanche sèche dégradée.

STATIONS	DISTANCES de l'usine	LIEUX-DITS	COORDONNEES
A	à 1660 m	Turtigeiu	626.950/128.480
B	à 825 m	Stadelachra	626.125/128.725
C	à 690 m	«S» de Niedergesteln	626.050/129.010
D	à 425 m	borne communale	625.750/129.010
E	à 375 m	parc à chevaux	625.700/129.075
F	à 250 m	parc à chevaux et station météo	625.575/129.090
G	à -3900 m	Bim-Wachthüsi	621.450/128.500

Tableau 1 – Stations de piégeage.

MATÉRIEL ET MÉTHODE

Piège Barber

Dans chaque station, 16 pièges Barber ont été disposés et groupés par quatre pour former des sous-stations. Au total, 112 pièges ont été placés, divisés en 28 sous-stations et sept stations. Le nombre de ces pièges a été calculé pour que l'échantillonnage soit le plus représentatif possible de la population réelle (OBTEL, 1971).

La récolte du matériel a été effectuée sur deux périodes de six semaines afin de piéger les espèces printanières et les espèces estivales (DUELLI *et al.*, 1990). La première s'étend du 13 mai au 17 juin 1994 et la deuxième du 28 septembre au 31 août 1994.

Le piège Barber est constitué d'un gobelet en plastique de 70 mm de diamètre et 75 mm de profondeur enfoui dans le sol jusqu'à ce que les bords du gobelet affleurent à la surface. Le tout est surmonté d'un cou-

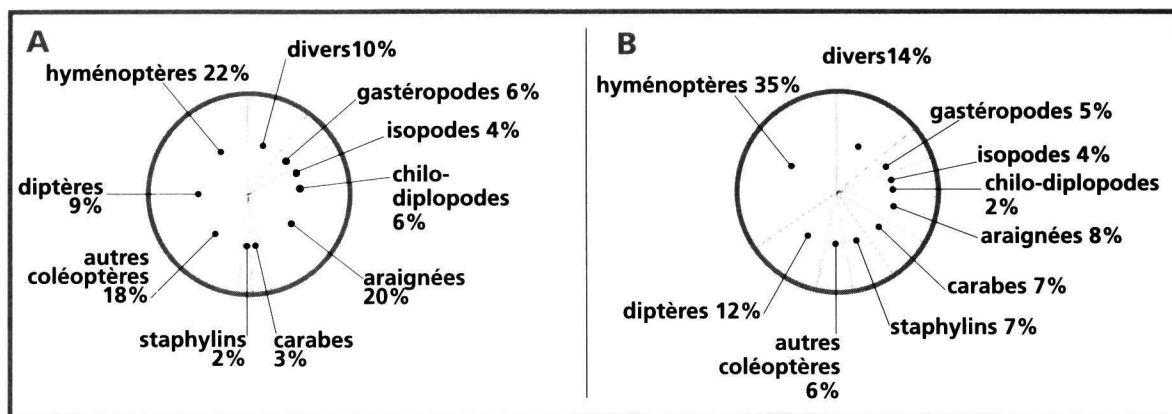


Figure 1 – Tri général: A au printemps, B en été.

vercle en plastique pour le protéger de la pluie et éviter qu'il ne se remplisse de litière. Le liquide conservateur est de l'éthylène glycol à 20% changé chaque deux semaines. En règle générale, un tiers du gobelet est rempli de ce liquide. Un piège par sous-station est mis en place sans éthylène glycol pour capturer de la faune vivante, son efficacité est alors beaucoup plus faible.

Tri général, détermination et traitement statistique

Le tri général a été effectué en laboratoire à l'aide d'une loupe binoculaire et a permis de séparer les divers groupes zoologiques qui étaient quantitativement les mieux représentés au printemps et en été (fig. 1).

La détermination des coléoptères carabiques a été faite selon FREUDE *et al.*, (1976) et a permis d'établir une liste faunistique précise des espèces présentes autour de l'usine.

Le tableau espèces-stations (tab. 3) est diagonalisé selon le premier axe d'une analyse factorielle des correspondances (AFC) puis légèrement remaniés de façon à faire ressortir la structure des communautés rencontrées dans les diverses stations. Cette méthode permet de définir pour un même espace factoriel les éléments de correspondances entre lignes et colonnes d'un tableau espèces-stations. Elle a été réalisée à l'aide du programme CANOCO (TER BRAAK, 1988).

RÉSULTATS ET DISCUSSION

Ensemble des captures

A l'exception de la microfaune du sol non comptabilisée, pas moins de 30000 individus ont été capturés en douze semaines par les 84 Barbers et séparés en dix groupes (fig. 1).

Le groupe le mieux représenté dans les résultats du tri général est celui des hyménoptères et en particulier la famille des *Formicidae* dont le comptage s'est parfois

révélé fastidieux. Dans le groupe des divers, on trouve des lépidoptères, des trichoptères, des hétéroptères, des mécoptères, des homoptères, des orthoptères, ainsi que des annélides, des opilions, des pseudoscorpions, des musaraignes et de jeunes campagnols: le piège Barber n'est pas très sélectif.

Le tri général a déjà mis en évidence les caractéristiques climatiques et végétales des stations: par exemple, les gastéropodes ne sont présents que dans les forêts humides, les isopodes et diplopes dans les forêts qui ont une bonne couche de litière, les araignées plutôt dans les prés, les hyménoptères (principalement des fourmis) et diptères dans toutes les stations.

Phénologie

En observant la phénologie des dix groupes faunistiques séparés lors du tri général, on remarque quelques tendances communes tout au long du piégeage du printemps et de l'été (fig. 2).

En effet tous les groupes voient le nombre de captures chuter après le 13.06.94. Cette baisse de l'activité est en lien direct avec le début des grandes chaleurs estivales. On sait que beaucoup d'espèces animales se mettent en diapause si les conditions de température et d'humidité deviennent difficiles et ne sont donc plus touchées par les pièges d'activité. Cette baisse s'explique aussi par le fait que les espèces à cycle printanier se trouvent à l'état larvaire à ce moment et ne sont plus piégées par le Barber.

Une autre baisse générale des captures se situe après le 25.08.94. A cette période, la plupart des espèces ont terminé leur cycle de reproduction et se préparent déjà à affronter les rigueurs hivernales. La baisse des captures se poursuivant durant les mois suivants, le piégeage a été interrompu.

On ne peut pas exclure non plus un effet du piégeage sur l'abondance de la faune terrestre, les captures régulières pouvant provoquer la baisse des populations.

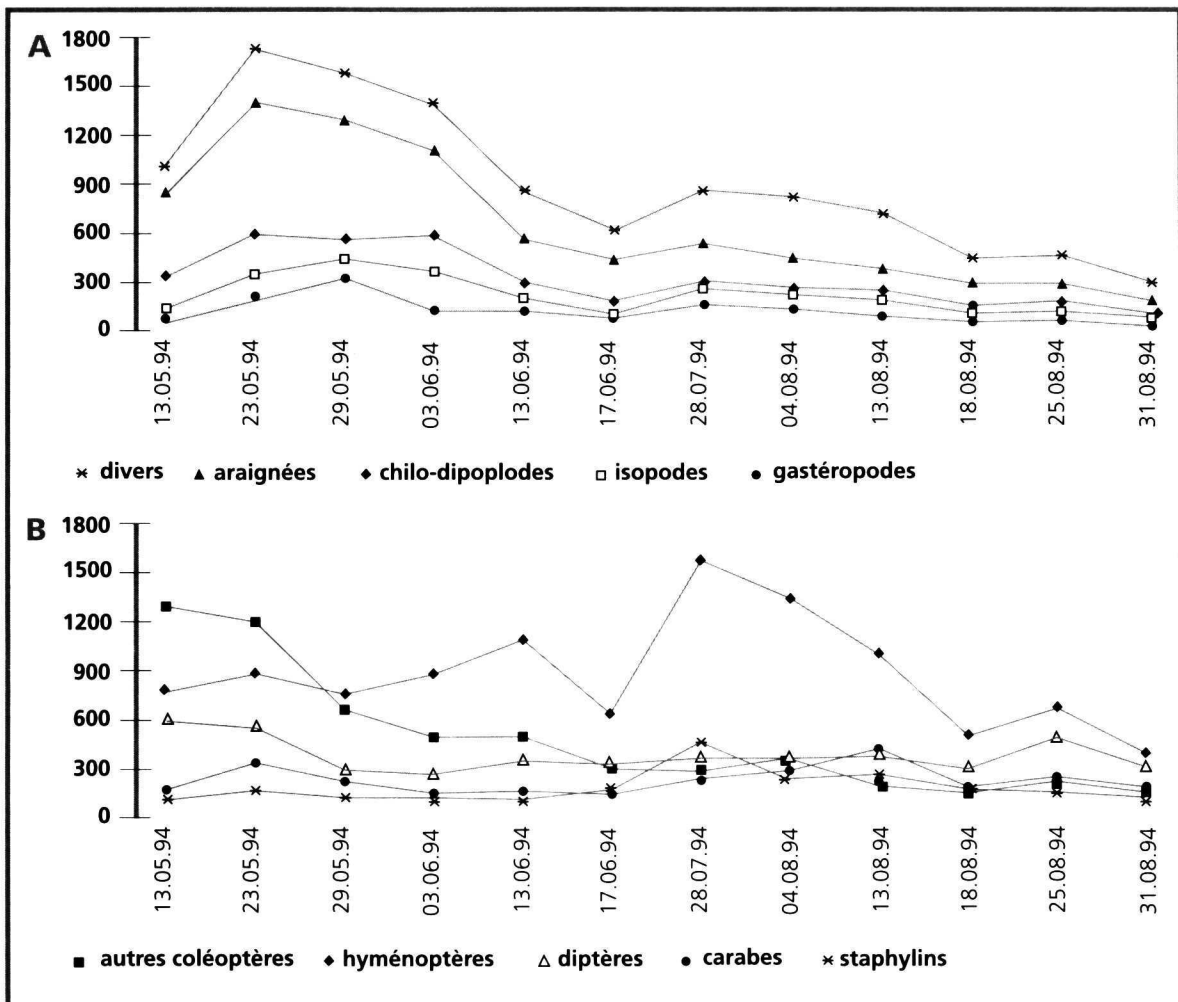


Figure 2 – Phénologie de l'ensemble de la faune. A: mollusques, arthropodes, divers. B: coléoptères, hyménoptères, diptères.

Une chute des captures touchant tous les groupes de la pédofaune s'est produite après le 13.08.94. Ce pic est dû à une baisse de température de plus de 10°C avec des précipitations entre le 13.08 et le 18.08. Ce brusque rafraîchissement a fortement freiné l'activité de la faune habituée à des températures extrêmement élevées durant tout le reste du mois d'août.

En ce qui concerne les pics d'abondance, de manière générale, on trouve deux périodes plus ou moins bien définies: au printemps du 23.05 au 13.06 et en été du 28.07 au 13.08. Ces deux pics correspondent à l'apparition des espèces printanières et des espèces estivales bien que cette distinction ne puisse pas être généralisée à l'ensemble des groupes précités et que l'on peut noter certains recouvrements ou chevauchements.

Le piégeage en deux périodes de six semaines (printemps et été) a permis la capture des carabes printaniers et automnaux.

Les carabes pris au printemps représentent 40% du total des captures alors que les carabes pris en été représentent 60% du total. Par contre, la diversité moyenne au printemps est supérieure à celle de l'été.

Quatre espèces représentent environ 60% du piégeage: la diversité repose sur les espèces peu abondantes, ce qui est habituellement le cas dans les études faunistiques (**tab. 2**).

L'abondance et la diversité des carabes au cours des piégeages hebdomadaires suivent celles de l'ensemble de la faune. A la fin du printemps, la dormance estivale affecte l'abondance et la diversité de même que la fin des cycles de reproduction en automne. La baisse brutale des températures de la mi-août affecte également le nombre de captures de carabes.

Classification en communautés

Analyse factorielle des correspondances (TER BRAAK, C.J.F., 1988)

Tableau 2 - Phénologie des carabes capturés.

GENRES	ESPÈCES	Printemps						Eté						TOTAL INDIV.	TOTAL %
		13.05.94	23.05.94	29.05.94	03.06.94	13.06.94	17.06.94	28.07.94	04.08.94	13.08.94	18.08.94	25.08.94	31.08.94		
<i>Calathus</i>	<i>melanocephalus</i>		5	12	2	7	8	13	53	129	34	73	40	376	30%
<i>Pterostichus</i>	<i>melanarius</i>	4	8	5	6	4	5	32	32	50	18	23	21	208	16%
<i>Abax</i>	<i>ater</i>	1	6	15	20	16	6	16	15	17	5	7	21	26	10%
<i>Calathus</i>	<i>erratus</i>	1	7	6	6	6	4	11	16	25	6	6	5	99	8%
<i>Amara</i>	<i>municipalis</i>	4	52	11	2	1			1		1			72	6%
<i>Harpalus</i>	<i>anxius</i>	14	16	6	3	12		1				1		53	4%
<i>Amara</i>	<i>bifrons</i>	1	27	5	1					1		3	1	39	3%
<i>Amara</i>	<i>communis</i>	9	11	6	1		1	4						32	3%
<i>Pterostichus</i>	<i>strenuus</i>	9	8	10	2	1		1						31	2%
<i>Licinus</i>	<i>depressus</i>		1					2	3	4	3	6	1	20	2%
<i>Syntomus</i>	<i>foveatus</i>	1	6					4	5	1		2		19	1%
<i>Amara</i>	<i>aenea</i>	5	8	2		1		1						17	1%
<i>Microlestes</i>	<i>maurus</i>	1	6	2				6						15	1%
<i>Platynus</i>	<i>obscurus</i>		1	1		1		1	9	1		1		15	1%
<i>Asaphidion</i>	<i>flavipes</i>	1	3	1	2	4	1					1		13	1%
<i>Amara</i>	<i>aulica</i>	1	2							1	3		5	12	1%
<i>Amara</i>	<i>plebeja</i>		3	3	1		4							11	1%
<i>Harpalus</i>	<i>pumilus</i>	4	2	2					1					9	1%
<i>Badister</i>	<i>ballatus</i>	2	1	1				1	1	3				9	1%
<i>Harpalus</i>	<i>smaragdinus</i>		1	2	2	3				1	2			9	1%
<i>Amara</i>	<i>tricuspidata</i>		4	2			2							8	1%
<i>Anisodactylus</i>	<i>binotatus</i>				2		5							7	1%
<i>Bembidion</i>	<i>lampros</i>	2		1				1	2					6	0%
<i>Bembidion</i>	<i>properans</i>	2	1				1	1	1					6	0%
<i>Panagaeus</i>	<i>bipustulatus</i>			1	1			3		1				6	0%
<i>Poecilus</i>	<i>cupreus</i>	1		1	1			1		2				6	0%
<i>Notiophilus</i>	<i>palustris</i>	2		1		1	1							5	0%
<i>Carabus</i>	<i>monilis</i>				2	1	1	1						5	0%
<i>Synuchus</i>	<i>vivalis</i>							1	3				1	5	0%
<i>Poecilus</i>	<i>lepidus</i>		3		1									4	0%
<i>Syntomus</i>	<i>truncatellus</i>								3	1				4	0%
<i>Harpalus</i>	<i>tardus</i>		1	1			1							3	0%
<i>Harpalus</i>	<i>rufipalpis</i>		2	1										3	0%
<i>Harpalus</i>	<i>serripes</i>			2				1						3	0%
<i>Brachinus</i>	<i>explosens</i>					2								2	0%
<i>Diachromus</i>	<i>germanus</i>										2			2	0%
<i>Poecilus</i>	<i>versicolor</i>				1									1	0%
<i>Agonum</i>	<i>sempunctatum</i>						1							1	0%
<i>Amara</i>	<i>fusca</i>	1												1	0%
<i>Calathus</i>	<i>fuscipes</i>									1				1	0%
<i>Pterostichus</i>	<i>niger</i>									1				1	0%
<i>Stomis</i>	<i>pumicatus</i>								1					1	0%
<i>Trechus</i>	<i>obtus</i>								1					1	0%
TOTAUX	INDIV:	66	184	99	56	60	41	102	147	239	74	123	76	1267	100%
TOTAUX	ESPÈCES	20	24	25	18	14	14	20	16	16	9	10	8		

Tableau 3 - Espèces-stations au printemps 1994 diagonalisé selon le premier axe d'une AFC.

GENRE	ESPÈCE	stF/sst2	stF/sst1	stE/sst2	stF/sst3	stF/sst4	stE/sst4	stE/sst3	stE/sst1	stD/sst4	stD/sst3	stD/sst2	stD/sst1	stC/sst2	stA/sst1	stB/sst4	stB/sst2	stA/sst2	stA/sst3	stB/sst3	stB/sst1	stC/sst4	stC/sst3	stC/sst1	stA/sst4	stG/sst3	stG/sst2	stG/sst1	stG/sst4
Amara	fusca					1																							
Harpalus	serripes					1		1																					
Bembidion	lampros			1		2																							
Microrlestes	maurus	1				8																							
Harpalus	pumilus					7			1																				
Harpalus	smaragdinus		3			3																							
Poecilus	lepidus	1				2		1																					
Syntomus	foveatus			1	2	3		1																					
Calathus	erratus		9	1	4	6	2	6	2																				
Amara	municipalis	1	18	2	12	26	1	9	1																				
Calathus	melanocephalus	5	4	3	6	3	3	7	3																				
Harpalus	anxius		4	3	2	21		4	15	1				1															
Amara	bifrons	1	12	2	4	12	1	1									1												
Amara	aenea				1	4		2		2	6							1											
Amara	tricuspidata					2		1			1	2	2																
Bembidion	properans							2					2																
Brachinus	explodens				1						1																		
Harpalus	rufipalpis								1			1	1																
Poecilus	versicolor										1																		
Agonum	sempunctatum											1																	
Anisodactylus	binotatus										2	2	3																
Poecilus	cupreus										1		2																
Harpalus	tardus											2	1																
Panagaeus	bipustulatus									1					1														
Amara	plebeja										2	1	5			1		1	1										
Notiophilus	palustris										1		2						1										
Asaphidion	flavipes							1	1		1	3	2	1				1	1						1				
Amara	communis						1				10	2	1	6			4		2	2									
Badister	bullatus											1				1	1		1										
Pterostichus	strenuus												1		1	2	14	2	2	5	3								
Amara	aulica																	2										1	
Platynus	obscurus											1					1									1			
Pterostichus	melanarius													2			1	1	1	1	3	10	6	1	1	1	4		
Licinus	depressus																										1		
Carabus	monilis																									3		1	
Abax	ater																									12	15	21	16

ESPÈCES	STATIONS							
	FORÊTS			HAIE		PARCS À CHEVAUX		
	A	B	C	G	D	E	F	
prairiales eurytopes mésophiles	Amara communis Asaphidion flavipes Bembidion properans* Poecilus cupreux	•	•	•	•	•	•	•
prairiales eurytopes hélio-thermo-xérophiles	Agonum sexpunctatum Bembidion lampros Calathus fuscipes Harpalus serripes Harpalus tardus Poecilus versicolor Syntomus truncatellus				•	•	•	•
prairiales sténotopes hélio-thermo-xérophiles	Amara eneae Amara bifrons Amara fusca+ Amara municipalis Amara tricuspidata+ Brachinus explodens Calathus erratus Calathus melanocephalus Diachromus germanus Harpalus anxius Harpalus pumilus Harpalus rufipalpis Harpalus smaragdinus+ Microlestes maurus Poecilus lepidus Syntomus foveatus	•		•	•	•	•	•
forestières eurytopes mésophiles	Amara aulica* Amara communis Asaphidion flavipes Badister bullatus Notiophilus palustris* Platynus obscurus Poecilus cupreux Pterostichus melanarius Pterostichus niger Pterostichus strenuus* Stomis puncticatus* Synuchus vivalis Trechus obtusus	•	•	•	•	•	•	•
forestières eurytopes hélio-thermo-xérophiles	Amara plebeja Licinus depressus Panagaeus bipustulatus+	•	•		•	•	•	
forestières sténotopes mésophiles	Abax ater Anisodactylus binotatus* Carabus monilis				•	•	•	

* = espèce hygrophile + = espèce menacée en Suisse (Marq, 1992)

Tableau 4 – Classification des carabes en communautés.

Au printemps (Tableau 3)

La communauté la mieux définie appartient aux stations E et F. Toutes les espèces de ces stations ont un caractère xérothermophile marqué. Les stations E et F présentent seules ces caractéristiques puisque ce sont des prés à végétation le plus souvent basse, très exposés au soleil avec des températures très élevées au niveau du sol durant l'été (jusqu'à plus de 45°C).

Une autre caractéristique de ces espèces est qu'elles affectionnent un sol léger sableux voir graveleux. Les espèces dominantes de cette communauté, *Harpalus anxius*, *Amara bifrons* et *A. municipalis* sont toutes xérothermophiles.

La deuxième communauté dégagée par le tableau correspond à la station D. Ces espèces sont moins inféodées au milieu; on trouve en effet un mélange de quelques espèces xérothermophiles supportant l'ombrage avec des espèces eurytopes et quelques hygrophiles. Les espèces dominantes, *Anisodactylus binotatus*, *Asaphidion flavipes*, *Amara communis*, *A. aenea* et *A. plebeja* sont en majorité des espèces eurytopes.

La troisième communauté comprend des espèces forestières ou hygrophiles. Les forêts A et B sont colonisées par ces espèces, la forêt C dont quelques caractéristiques écologiques sont différentes (humidité nettement plus importante) ne convient quasiment qu'à *Pterostichus melanarius*. Les espèces dominantes des forêts sont *Pterostichus strenuus* et *P. melanarius*.

La dernière communauté qui est révélée par le tableau ne se trouve que dans la forêt G. Elle comprend des espèces forestières communes à d'autres stations telles que *Pterostichus melanarius*, *Licinus depressus*, et des espèces qui lui sont propres telles que *Carabus monilis* et *Abax ater*. L'espèce dominante est *Abax ater*.

La présence de cette espèce indique que les conditions microclimatiques de cette station diffèrent de celles des autres forêts.

Certaines espèces supportent plusieurs biotopes légèrement différents. Ainsi on trouve *Amara aenea*, *A. tricuspidata* et *Bembidion properans* dans la haie et les prés; *Amara communis* très eurytope a été capturé dans la forêt B et le champs E; *Asaphidion flavipes*, *Amara plebeja* et *Notiophylus palustris* ont été trouvés en forêt et dans les stations plus sèches. Enfin *Pterostichus melanarius* est une espèce commune aux quatre stations forestières.

En été

La situation ressemble beaucoup à celle du printemps avec quelques différences comme les deux espèces *Calathus erratus* et *C. melanocephalus* qui ont remplacé les *Amara* dans les prés et la haie. Cette dernière est beaucoup moins riche en espèces qu'au printemps.

CONCLUSION

Le piégeage au Barber dans sept stations autour de l'usine d'aluminium de Steg a permis d'établir des tableaux représentatifs de la macrofaune du sol.

Le tableau des espèces et des stations (Tab. 4) définit de manière précise les communautés de Carabes. Chacune de ces communautés évolue dans des stations aux qualités écologiques différentes soit par la nature du sol, soit par la végétation, soit par la présence proche de la surface de la nappe phréatique...

Les espèces hélio-thermo-xérophiles indiquent respectivement les stations les plus ensoleillées, les plus chaudes et les plus sèches soit E, F. Les espèces mésophiles ou hygrophiles nous indiquent respectivement les stations plus ombragées et plus humides: A,B,D et C,G.

Les espèces eurytopes se trouvent dans plusieurs stations alors que les espèces sténotopes font presque toutes partie de la grande communauté xérothermophile à laquelle appartiennent trois espèces menacées en Suisse à savoir ***Amara fusca***, ***A. tricuspidata*** et ***Harpalus smaragdinus***: les stations E et F (parc à chevaux) constituent de ce fait un biotope digne d'intérêt.

L'abondance maximale s'observe soit pour des espèces forestières eurytopes mésophiles telles que ***Pterostichus melanarius*** et ***Abax ater*** qui ne nécessitent aucune protection particulière soit pour des espèces prairiales xérothermophiles sténotopes extrêmement bien adaptées à un biotope très sélectif telle que ***Calathus melanocephalus*** et qui peuvent être rapidement menacées par des changements naturels ou artificiels de leur habitat.

La diversité carabique la plus importante sur les deux piégeages concerne la communauté xérothermophile des prés (plus de 15 espèces). La haie, en tant que zone refuge, possède une diversité comparable mais seulement au printemps, par contre, les stations forestières sont beaucoup plus pauvres en espèces.

La sensibilité des carabes aux facteurs écologiques en fait un groupe très intéressant pour tous les problèmes touchant à la biodiversité et à la qualité des biotopes. D'autres travaux sur les communautés carabiques (BORCARD, 1981-1982, CAZIN, 198, KONZELMANN, 1987, TRAUTNER, 1987, MARGGI, 1992) ont aussi montré la valeur des groupements définis dans ce travail.

REMERCIEMENTS

Je tiens à exprimer mes plus vifs remerciements: Au Professeur Willy Matthey pour la qualité de son encadrement et pour sa disponibilité tout au long de mon travail et la mise au point de cette publication; au Dr. Daniel Borcard pour sa participation compétente particulièrement appréciée lors du traitement statistique des données; à W. A. Marggi pour la vérification des déterminations difficiles; à François Contat et à la Station Fédérale de recherches en agroécologie et agriculture de Liebefeld pour leur étroite collaboration; à Charly Rey pour la description phytosocio-

logique des stations; au Musée d'histoire naturelle de Sion pour la mise à disposition de collections et d'ouvrages de référence et à toutes les autres personnes qui ont contribué au succès de cette étude.

BIBLIOGRAPHIE

- BORCARD, D. 1981. Utilisation de pièges Barber dans l'étude des Carabides forestiers sur un transect Grand-marais-Chasseral, *Bull. soc. neuchâteloise des sciences naturelles*, t. 104, 108-118.
- 1982. Etude des communautés de Carabidae dans quelques associations forestières de la région neuchâteloise: aspects phénologiques. *Bull. Rom. Entom.*, 1, 125-134.
- 1982. Etude des communautés de Carabidae dans quelques associations forestières de la région neuchâteloise: aspects statistiques. *Bull. Soc. Entom. Suisse*, 55, 169-179.
- CAZIN, PH. 1982. Essai de définition de groupements écologiques de Carabes caractéristiques des prairies, friches et forêts. *Bull. E. N. S. A. I. A.*, 14, 12-27.
- DUELLI, P., M. STUDER, & E. KATZ. 1990. Minimalprogramme für die Erhebung und Aufbereitung zooökologischer Daten als Fachbeiträge zu Planungen am Beispiel ausgewählter Arthropodengruppen. *Schr.-R. f. Landschaftspflege und Naturschutz*, H. 32, 211-222.
- FREUDE, H., K.-W. HARDE, & G.-A. LOHSE. 1976. *Die Käfer Mitteleuropas*. Goecke & Evers Verlag, Krefeld, vol. 3, 301 pp.
- KONZELMANN, E. 1987. Die Koleopterenfauna edaphischer Biotope einiger Grünlandbrachen im südlichen Pfälzerwald. *Pollichia-Buch*, 12, 303-382.
- LUKA, H. 1996. Laufkäfer: Nützlinge und Bioindikatoren in der Landwirtschaft. *Agrarforschung*, 3 (1), 33-36.
- MARGGI, W.-A. 1992. *Faunistik der Sandlaufkäfer und Laufkäfer der Schweiz (Cicindelidae & Carabidae) Coleoptera*. C.S.C.F., Terreaux 14, CH-2000 Neuchâtel, Teil 1, 477 pp.; Teil 2, 243 pp.
- OBRTTEL, R. 1971. Number of pitfall traps in relation to the structure of the catch of soil surface Coleoptera. *Acta entomol. bohemoslov.* 68 (5), 300-309.
- TER BRAAK, C.J.F. 1988. Canoco: an extension of DECORANA to analyze species environment relationships. *Vegetatio* 75, 159-160.
- THIELE, H.-U. 1977. *Carabid Beetles in their environments*. Springer-Verlag, Berlin; 355 pp.
- TRAUTNER, J. 1987. Die Laufkäfer (Coleoptera, Carabidae) der Grünlandbrachen des südlichen Pfälzerwaldes. *Pollichia-Buch*, 12, 261-302.

Etude de la pédofaune proche de l'usine d'aluminium de Steg, VS

II. Relation entre l'accumulation de fluor de quelques groupes d'invertébrés et les teneurs en fluor du sol et des plantes

par François Contat¹, Jacques Claivoz², Willy Matthey³, Daniel Borcard⁴



Carabus monilis. – PHOTO JACQUES CLAIVOZ

ZUSAMMENFASSUNG

Studie der Pedofauna nahe dem Aluminiumwerk von Steg.

II. Beziehung zwischen der Fluorakkumulation wirbelloser Tiere und dem Fluorgehalt von Boden und Pflanzen

Der Fluorgehalt der Makrofauna wurde in unterschiedlicher Distanz zur Aluminiumfabrik in Steg (VS) untersucht und mit jenem des Bodens und der Streuschicht in Beziehung gesetzt. Im Bereich der Stellen mit Insektenfallen lagen die Fluorwerte in Boden und Streuschicht deutlich über den Richtwerten der Verordnung über Schadstoffe im Boden (VSBö). Im Vergleich mit Kontrollen ausserhalb der Untersuchtenregion wiesen die Asseln (*Isopoda*) und Doppelfüssler (*Diplopoda*) besonders hohe Fluorgehalte auf. Diese lagen bei Spinnen (*Araneae*), Ameisen (*Formicidae*) und Laufkäfern (*Carabidae*) tiefer, aber im Vergleich zu den Referenzwerten immer noch sehr hoch. Zwischen den Fluorgehalten der Doppelfüssler und jenen von Boden und Streuschicht wurde eine starke Korrelation beobachtet, nicht aber bei Asseln, Spinnen, Ameisen und Laufkäfer. Die Reaktion der gesamten Bodenfauna auf die Fluorimmissionen war im Frühling besonders ausgeprägt, während im Sommer nur bei Asseln und Doppelfüsslern eine signifikante Beziehung zwischen ihrem Fluorgehalt und jenem des Bodens und der Pflanzen festgestellt werden konnte.

RÉSUMÉ

Etude de la pédofaune proche de l'usine d'aluminium de Steg

II. Relation entre l'accumulation de fluor de quelques groupes d'invertébrés et les teneurs en fluor du sol et des plantes

La teneur en fluor de la macrofaune du sol a été comparée à la teneur en fluor du sol, et de la litière dans la région de Steg (VS). Dans les stations de piégeage, les teneurs en fluor des sols et de la litière se situent amplement au-dessus des valeurs indicatives de l'Ordonnance sur les polluants du sol (Osol).

Les isopodes et diplopodes présentent des teneurs en fluor exceptionnellement élevées. Bien que les araignées, les fourmis et les carabes accumulent relativement peu de fluor, leur teneur n'en reste pas moins très élevée, par rapport à leur valeur de référence respective. Les teneurs en fluor des diplopodes montrent une excellente corrélation avec les teneurs en fluor du sol et de la litière alors que les isopodes, les araignées, les fourmis et les carabes l'expriment peu ou pas. Au printemps, l'ensemble de la pédofaune réagit aux gaz fluorés, alors qu'en été, seuls les isopodes et les diplopodes marquent significativement cette réceptivité.

Mots clés: pollution par le fluor, arthropodes carabidés.

¹ Station fédérale de recherche en agroécologie et agriculture (FAL) – Institut de recherches en protection de l'environnement et en agriculture (IUL) CH-3003 Berne

² Place de l'Envol 5, 1950 Sion

³ Rue de l'Ouest 12, 2046 Fontaines

⁴ Département des Sciences biologiques Université de Montréal, Québec H3C 3J7, Canada.

INTRODUCTION

La pollution fluorée, particulièrement issue de l'industrie de l'aluminium, a un impact sur l'environnement et sur l'agriculture (POURCHET & SCHAEER, 1992). Les gaz et les poussières fluorés se déposent sur la végétation où ils s'accumulent. La litière, provenant de ces végétaux, est enrichie en fluor et, après décomposition de celle-ci, ce dernier passe dans le sol. La régénération de ces milieux perturbés est peu connue. Avec la fermeture vraisemblable de l'usine d'aluminium de Steg dans les prochaines années, la possibilité se présente d'établir un inventaire de la situation actuelle de la pollution fluorée de cette région du Haut-Valais au niveau pédologique, faunistique et floristique avant et après la fermeture définitive de l'usine. Ces inventaires permettront de montrer les possibilités de réaction et de régénération du milieu agricole et environnemental. Différentes recherches ont été effectuées de 1993 à 1996.

Les recherches conduites jusqu'à aujourd'hui dans la région de Steg ont touché particulièrement les sols, la végétation, l'air (CONTAT & ZUBER, 1977, GUYER, 1989, CONTAT *et al.*, 1994) et très peu la macrofaune. Seul, un travail sur les abeilles (LEHNHERR, 1989) a été publié, dans lequel l'auteur a mis en relation le fluor des feuilles de bouleaux avec celui des abeilles décédées dans la région de Steg. C'est dans ce cadre qu'un travail de diplôme (CLAIVOZ, 1996, 1998) concernant l'étude de quelques groupes d'invertébrés a été mené par l'Université de Neuchâtel.

Une étude sur la macrofaune du sol et de sa relation avec les teneurs en fluor du sol compléterait notre inventaire et devrait permettre de mieux dessiner le chemin suivi par le fluor dans la chaîne alimentaire.

MATÉRIEL ET MÉTHODE

Récolte et préparation des échantillons

Dans son étude CLAIVOZ (1996) a choisi sept stations autour de l'usine de Steg, dans l'axe de la vallée du Rhône. Dans chaque station, 16 pièges Barber ont été disposés et groupés par quatre pour former des sous-stations. La récolte du matériel a été effectuée, en 1994, sur deux périodes de six semaines afin de piéger les espèces printanières et les espèces estivales. Le piège Barber est constitué d'un gobelet en plastique de 70 mm de diamètre et 75 mm de profondeur, planté dans le sol jusqu'à ce que les bords du gobelet affleurent à la surface. Le tout est surmonté d'un couvercle en plastique. Le liquide conservateur est de l'éthylène glycol à 20%.

En 1997, un piégeage supplémentaire a été effectué afin de contrôler l'exactitude de certains résultats obtenus en 1994. Des valeurs de références ont été

calculées à partir d'arthropodes provenant de Sion et Finhaut pour les isopodes (3 échantillons), les diplopodes (2 échantillons), les araignées (1 échantillon) et les fourmis (2 échantillons). Les carabes ont été capturés à Sion (1 échantillon) et hors du canton du Valais (6 échantillons).

Chaque échantillon se composait, selon la dimension des insectes, de trois à quelques dizaines d'insectes.

Des échantillons de sol ont été prélevés dans les sept stations entre 0 et 20 cm. La litière a été ramassée séparément.

L'analyse bisannuelle **d'herbages permanents** de six stations de contrôle (récoltes en mai et septembre) disposées entre Susten et Termen et d'un témoin situé à Blitzingen (39 km à l'est de l'usine) permet de suivre l'évolution temporelle et spatiale de l'immission fluorée. Chaque station comprend quatre répétitions. Cette enquête s'effectue régulièrement depuis 1979.

Analyse des teneurs en fluor

Plantes

Les plantes sont d'abord séchées à 60°C pendant 24 heures puis calcinées et, après fusion alcaline (NaOH) des cendres, celles-ci sont mises en solution.

Insectes

Les insectes sont séchés durant une nuit à 80°C. Ils sont plongés ensuite dans un lait de chaux pendant 30 minutes, calcinés à 500°C durant 3 heures et, après fusion alcaline (NaOH) des cendres, mis en solution.

Litière

La teneur en fluor de la partie organique de la litière a été déterminée après séparation des parties minérales (poussières, particules de terre) des échantillons d'herbe par décantation dans du tétrachlorure de carbone. Le fluor total et soluble ont été analysés comme indiqués si après pour l'analyse des sols.

Sols

L'analyse du fluor total (F^{tot}) est identique à celle des plantes. Le fluor soluble (F^{sol}) est évalué à partir d'une solution obtenue après barbotage du sol dans de l'eau distillée.

Dosage

Le dosage du fluor est effectué à l'aide d'une électrode spécifique. Les résultats sont exprimés en ppm F = mg F / kg m.s.

Analyse statistique

Pour comparer les données de fluor des sols, de la litière et de la faune on a utilisé le coefficient de corrélation de rang de Kendall ou τ (tau) de Kendall (ZAR, 1996). Pour éviter l'acceptation de valeurs non significatives, le seuil de probabilité a été abaissé à 0.0025 (correction de Bonferroni: (τ de Kendall = 0.05/20 = 0.0025).

STATIONS	DISTANCES m	ISOPODES ppm F	DIPLOPODES ppm F	ARAIGNÉES ppm F	FOURMIS ppm F	CARABES ppm F
A	1660	1020	892	226	102	75
B	825	1522	987	366	443	104
C	690	1486	2978	475	140	67
D	425	2234	3172	537	242	91
E	375	932	1756	290	68	381
F	250	1218	1042	320	100	264
G	-3900	962	1572	255	102	36
Moyenne géom.		1280	1573	337	140	108
Référence		124	88	8	66	6

Tableau 1 – Teneurs en fluor des arthropodes (mg F/kg m.s.) capturés au printemps en fonction des stations situées à différentes distances de l'usine.

STATIONS	DISTANCES m	ISOPODES ppm F	DIPLOPODES ppm F	ARAIGNÉES ppm F	FOURMIS ppm F	CARABES ppm F
A	1660	1162	928	198	61	116
B	825	1404	1378	300	74	92
C	690	3339	2416	552	125	48
D	425	2034	4339	408	61	456
E	375	1123	963	356	53	97
F	250	2065	—	292	116	99
G	-3900	906	1082	208	119	53
Moyenne géom.		1567	1551	312	82	102
Référence		124	88	8	66	6

Tableau 2 - Teneurs en fluor des arthropodes (mg F/kg m.s.) capturés en été en fonction des stations situées à différentes distances de l'usine.

Le test des rangs de Kruskal et Wallis (ZAR, 1996) a permis de comparer les teneurs en fluor de l'ensemble des stations pour les cinq groupes d'arthropodes en fonction des périodes de piégeage. Une correction de Bonferroni a abaissé seuil de probabilité à 0.01.

RÉSULTATS ET DISCUSSION

Fluor du sol et de la litière

Les teneurs en fluor total (Ftot) du sol et de la litière, en fonction de la distance de l'usine, se situent

dans l'ensemble au-dessus de la valeur limite de 400 ppm F prescrit par l'Ordonance sur les polluants du sol (Osol) de 1986 (**fig. 1**). Les teneurs moyennes en Ftot de la litière sont légèrement supérieures (12%) à celles du sol. Dans la **fig. 2**, les teneurs en fluor soluble (Fsol) sont en moyennes de 2 à 3 fois la valeur de 25 ppm prescrite par l'Osol. La litière a une teneur en fluor soluble supérieure de 40% à celle du sol. L'analogie de l'évolution des deux figures marque l'influence de la source, particulièrement dans les premiers mille mètres à l'est de l'usine. La répartition géographique du fluor peut être comparée à celle obtenue pour le fourrage de la région de Steg (**fig. 3**).

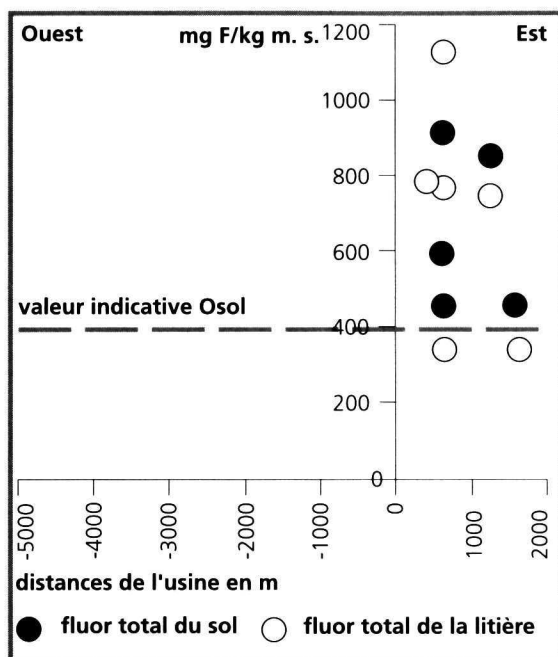


Figure 1 – Teneurs en fluor total (mg F/kg m. s.) du sol et de la litière en fonction de la distance de l'usine.

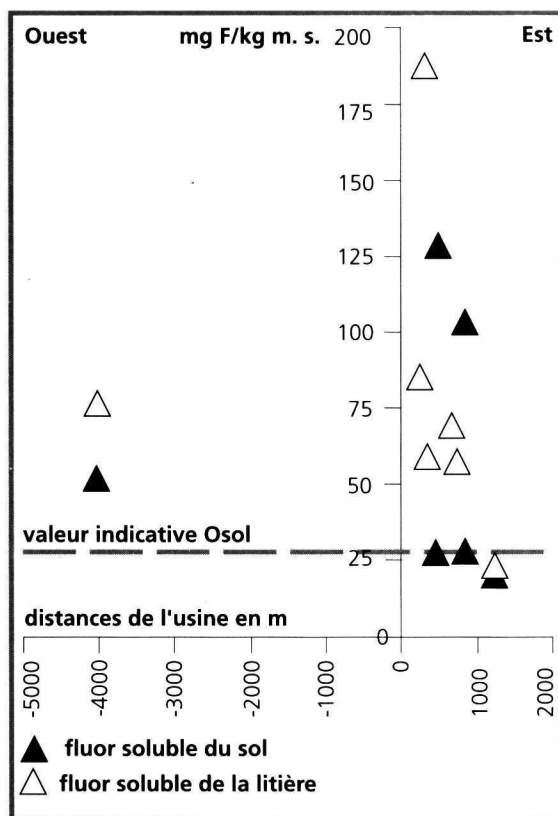


Figure 2 – Teneurs en fluor soluble (mg F/kg m. s.) du sol et de la litière en fonction de la distance de l'usine.

Il n'y a pas de différence significative entre la matière organique et minérale de la litière, les teneurs en fluor se répartissent à égalité entre les deux substrats avec une médiane de 394 ppm et des valeurs extrêmes variant entre 118 et 822 ppm F.

Les teneurs assez élevées de la litière de la station G (tab. 1), particulièrement en fluor soluble (3,2 fois la valeur indicative de l'Osol (1986), malgré son éloignement relatif de l'usine, s'expliquent par les influences conjointes de l'usine d'aluminium de Steg et de l'ancienne usine d'aluminium de Chippis.

Fluor de la faune

Les tableaux 1 et 2 présentent les teneurs en fluor des arthropodes récoltés respectivement au printemps et en été 1994 dans les sept stations. La référence est calculée à partir de la moyenne des captures de 1994 et 1997.

Les teneurs maximales en fluor se trouvent généralement proche de l'usine (entre 425 et 690 m) et diminuent avec l'éloignement.

Les isopodes et les diplopodes accusent des teneurs en fluor extrêmement élevées aussi bien au printemps qu'en été, soit respectivement de 7 à 27 fois et de 11 à 49 fois leur valeur de référence. Ces teneurs extrêmement élevées ont été confirmées par les résultats des piégeages de 1997 (fig. 4). Statistiquement, les résultats de 1997 ne diffèrent pas de ceux de 1994.

Les teneurs en fluor des araignées sont aussi très élevées par rapport à la valeur de référence (de 26 à 74 fois). Bien que les fourmis et les carabes accumulent relativement moins de fluor que les isopodes ou les diplopodes, la teneur en fluor des carabes est de 8 à 76 fois la valeur de référence des carabes.

Les fortes teneurs en fluor des isopodes et des diplopodes peuvent s'expliquer par les hypothèses suivantes:

- le régime alimentaire détritivore les expose directement aux fortes concentrations de fluor accumulées durant l'année dans les feuillages.
- leur exosquelette possède des incrustations de calcium qui réagit avec le fluor pour former du CaF_2 qui se fixerait dans leur carapace (WALTON, 1987).
- à l'instar du cuivre organique (BUSE, 1986), le fluor contenu dans la litière pourrait être libéré lors du passage dans l'intestin des isopodes.
- le fluor gazeux (HF) présent dans l'atmosphère pourrait être absorbé directement par les processus respiratoires. Ce dernier point est aussi valable pour d'autres arthropodes.

COMPARAISON DES TENEURS EN FLUOR DU SOL, DE LA LITIÈRE ET DE LA FAUNE

Le τ de Kendall révèle que seules les teneurs en fluor des **diplopodes** sont corrélées avec celles des sols et de la litière. Contrairement à la bibliographie

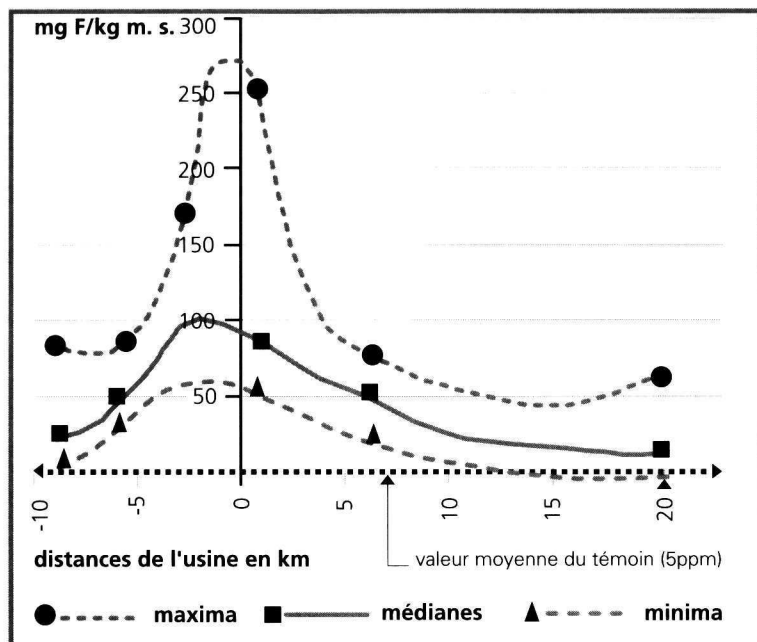


Figure 3 – Teneur moyenne (1993 à 1997) en fluor des fourrages (mg F/kg m. s.) de la région de Steg, en fonction de la distance de l'usine, de 1993 à 1997.

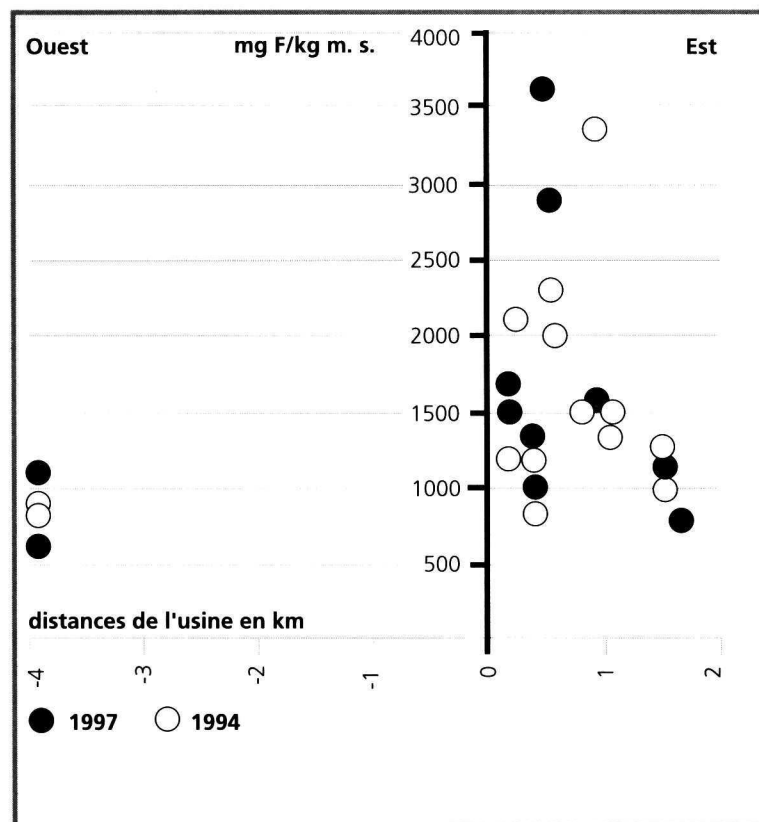


Figure 4 – Distribution des teneurs en fluor (mg F/kg m. s.) des isopodes capturés en 1994 et 1997 en fonction de la distance de l'usine.

(BUSE, 1986; VOGEL, 1989), le test n'est pas significatif pour les **isopodes** alors qu'ils présentent tout de même de fortes teneurs en fluor. Cette différence pourrait provenir du fait que chez les **diplopodes** nous n'avons pratiquement que des *Julidae* mangeurs de litière tandis que chez les **isopodes** nous trouvons des espèces très différentes. En effet *Trachelipus rathkei* mesure 12 mm, et se nourrit de litière alors que *Platyarthrus hoffmannseggii* mesure 3 mm, et se nourrit de boulettes de nettoyage de fourmis. L'accumulation du fluor étant liée au régime alimentaire, ces deux espèces ne présentent pas les mêmes concentrations. Cette remarque s'adresse particulièrement aux stations qui n'ont que l'une des deux espèces.

Une autre cause du manque de probabilité pourrait résulter de l'imprécision de l'électrode pour des échantillons d'un poids inférieur à 0,1 g.

Les teneurs en fluor des autres groupes (araignées, fourmis, carabes) ne sont pas significativement corrélées au fluor de la litière et du sol. Ces résultats corroborent ceux de BUSE (1986). L'influence du régime alimentaire sur l'accumulation du fluor est donc confirmée. Toutefois il faut relever que les teneurs en fluor des **araignées** au printemps sont étonnamment bien corrélées avec le fluor soluble dans le sol. Il est possible que certaines espèces d'araignée se nourrissent d'espèces accumulatrices de fluor (*isopodes*). Une étude approfondie serait nécessaire pour vérifier cette hypothèse.

Plusieurs études traitent de contaminations au fluor de la pédofaune: la corrélation positive entre les teneurs en fluor des isopodes, des sols et de la litière a été observée dans les travaux de WALTON (1987); la dose de fluor dans la litière provoquant une mortalité anormalement élevée chez les isopodes a été fixée à 440 mg F/kg m. s. dans les essais en laboratoire de BEYER *et al.* (1987). VAN WENSEM & ADEMA (1991) ont démontré l'effet direct du fluor sur les processus microbiens de décomposition de la litière mais pas sur le fonctionnement métabolique des isopodes. Parmi les travaux les plus intéressants, BUSE (1986) et VOGEL *et al.* (1989)

	ISOPODES	DIPLOPODES	ARAIGNÉES	FOURMIS	CARABES
sol F tot.	n.s.	0.0001	n.s.	n.s.	n.s.
sol F sol.	0.0012	0.0001	0.0001	n.s.	n.s.
litière F tot.	n.s.	0.0003	n.s.	n.s.	n.s.
litière F sol.	n.s.	0.0014	n.s.	n.s.	n.s.
ns = corrélation non significative					

Tableau 3 – Taux de probabilité (p) des corrélations entre les teneurs en fluor chez les arthropodes et dans le sol lors des piégeages printaniers.

	ISOPODES	DIPLOPODES	ARAIGNÉES	FOURMIS	CARABES
sol F tot.	n.s.	0.0018	n.s.	n.s.	n.s.
sol F sol.	n.s.	0.0001	n.s.	n.s.	n.s.
litière F tot.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.
litière F sol.	n.s.	0.0007	n.s.	n.s.	n.s.
ns = corrélation non significative					

Tableau 4 - Taux de probabilité (p) des corrélations entre les teneurs en fluor chez les arthropodes et dans le sol lors des piégeages estivaux.

	ISOPODES	DIPLOPODES	ARAIGNÉES	FOURMIS	CARABES
printemps	0.0039	0.0058	0.0008	0.0021	0.0035
été	0.0038	0.0035	n.s.	n.s.	n.s.
ns = corrélation non significative					

Tableau 5 – Taux de probabilité (p) de corrélation de l'ensemble des stations par groupes d'arthropodes et par époque de piégeage.

démontrent que la bio-accumulation du fluor est en relation avec le régime alimentaire des groupes zoologiques. Dans l'ordre croissant de concentration en fluor nous trouvons selon eux les herbivores, les omnivores, les prédateurs et finalement les meilleurs accumulateurs que sont les décomposeurs. Chez les **carabidaes**, la plupart des espèces capturées sont omnivores. Quelques espèces toutefois sont strictement carnivores (*Calathus fuscipes*) ou strictement phytophages (*Harpalus anxius*) THIELE, (1977). Ces coléoptères présentent des concentrations moins élevées que les **araignées** (carnivores) et basses par rapport aux décomposeurs. Seul les carabes dont les larves sont strictement carnivores peuvent présenter des teneurs de fluor plus importantes (BUSE, 1986).

COMPARAISON DES TENEURS EN FLUOR DE LA FAUNE ENTRE LES SAISONS

La comparaison des teneurs en fluor de l'ensemble des stations pour les cinq groupes d'arthropodes en fonction des périodes de piégeage apparaît dans le **tab. 5**. Au printemps, les teneurs en fluor de la faune sont significativement différentes entre les stations dans tous les groupes examinés. L'ensemble de la pédofaune est donc sensible à la dispersion non uniforme de la pollution fluorée dans les stations.

Par contre en été, seuls les **isopodes** et les **diplo-podes** répondent de façon significative. Les décomposeurs accumulent le fluor durant la période de végétation et sont par conséquent de très bons indicateurs de la

pollution fluorée. Le manque de réponse chez les **araignées**, les **fourmis** et les **carabes** pourrait être lié au passage des communautés printanières aux communautés estivales ou à une activité réduite en hiver. Une étude de la phénologie et du régime alimentaire des espèces pourrait fournir une explication à ce phénomène.

CONCLUSION

La forte contamination des sols et de la litière agit directement sur la bio-accumulation de fluor par la pédofaune. En effet, le régime alimentaire est le principal responsable de l'accumulation de fluor de la pédofaune. Les décomposeurs sont les plus touchés par la pollution, avant les prédateurs, les omnivores et les herbivores (BUSE, 1986; VOGEL *et al.*, 1989; WALTON, 1987). Dans l'ensemble, la teneur en fluor des macroarthropodes de la région de Steg, est très élevée. Son influence sur les communautés de carabes est masquée par la nette prépondérance des facteurs microclimatiques, pédologiques et des types de végétation.

Un piégeage plus important et une étude plus poussée des différents groupes d'arthropodes uniquement sur des milieux homologues serait nécessaire pour mettre en évidence l'impact réel de ce polluant d'origine anthropogène sur les différents macroinvertébrés de la pédofaune.

REMERCIEMENTS

Nos remerciements s'adressent à Mme R. Perler de l'Institut de recherches en protection de l'environnement et en agriculture de Liebefeld pour les analyses de fluor, aux différentes personnes qui ont relu le texte et enfin à toutes les autres personnes qui ont œuvré au succès de ce travail.

BIBLIOGRAPHIE

- BEYER, W. N., W. J. FLEMING, D. SWINEFORD. 1987. Changes in Litter near an Aluminium Reduction Plant. *J. Environ. Qual.*, 16, (3), 246-250
- BUSE, A. 1986. Fluoride accumulation in invertebrates near an aluminium reduction plant in Wales. *Environmental Pollution*, Series A, 27, 369-384.
- CLAIVOZ, J. 1996. *Communauté de carabidés proche de l'usine d'aluminium de Steg et accumulation de fluor par quelques groupes d'invertébrés*. Travail de diplôme Neuchâtel, 93 p
- 1998. Etude de la pédofaune proche de l'usine d'aluminium de Steg, VS. I. Les communautés carabiques. *Bull. Murith.* 116: 23-31.
- CONTAT, F. & R. ZUBER. 1977. Contrôle des immissions fluorées dans le Haut-Valais à l'aide d'une graminée fourragère. *Rev. suisse Vitic. Arboric. Hortic.*, 9, 65-68.
- CONTAT, F., F. X. STADELMANN, W. STAUFFER, L. GENOUD, J. ZADELEK. 1994. Le fluor édaphique n'a pas d'influence notable sur la teneur en fluor d'une graminée fourragère (*Lolium perenne*). Résultats

- d'un essai effectué en Valais. *Bull. Murithienne*, 112, 117-133.
- GUYER, Ch. 1989. *Die Fluorbelastung in der Region Steg (VS) und ihre Auswirkung auf die Qualität von Futterpflanzen*. Lizentiatsarbeit. Universität Bern.
- LEHNHERR, B. 1989. Bienen als Wächter der Natur. *Schweiz. Bienen-Zeitung* 112 (11), 641-645
- POURCHET, R. & F. SCHAEER. 1992. *Le fluor: impact sur l'environnement et aspects thérapeutiques*. Thèse de pharmacie Besançon, 430 p.
- THIELE, H.-U. 1977. *Carabid Beetles in their environments*. Springer-Verlag, Berlin, 1-369.
- VAN WENSEM, J. AND T. ADEMA. 1991. Effects of Fluoride on Soil Fauna Mediated Litter Decomposition. *Environmental Pollution*, 72, 239-251.
- VOGEL J., F. RICHARD, B. J. OTTOW. 1989. Fluorbelastung von Böden, Vegetation und Bodentieren in der unmittelbaren Umgebung eines Emittenten. *Verhandlungen der Gesell. für Oekologie*. 17, 619-625.
- WALTON, K. C. 1987. Factors Determining Amounts of Fluoride in Woodlice *Oniscus asellus* and *Porcellio scaber*, Litter and Soil near an Aluminium Reduction Plant. *Environmental Pollution*, 46, 1-9.
- ZAR, J.H. 1996. *Biostatistical Analysis*. Third Edition. Prentice Hall Upper Saddle River.

